

국내 화력발전산업의 연료의 효율적 배분과 CO_2 저감규모 추정*

이 명 헌**

〈요 약〉

일반적으로 정부규제를 포함한 여러 제약적 환경에 직면한 기업은 생산요소 투입단계에서 요소간의 비효율적인 배분으로 인하여 적정 수준 대비 각 요소의 과잉 혹은 과소 사용이 초래된다.

본 논문에서는 국내 화력발전산업을 대상으로 적정 수준의 자본스톡 규모를 전제로 화석연료간의 효율적 배분 여부를 검증하고 각 연료별 과잉·과소 투입량을 산정한 다음 각 연료를 적정 수준으로 투입할 경우 확보할 수 있는 잠재적 CO_2 감축량을 추정하였다. 1987~2008년 기간에 걸쳐 모든 화석연료에 대한 효율적 배분 조건이 기각됨에 따라 화력발전소는 주어진 연료의 시장가격으로 생산비용의 최소화를 달성하지 못하는 것으로 나타났다. 또한 두 연료간의 효율적 배분 여부를 검증한 결과 석탄과 석유 간, 석탄과 가스 간, 그리고 석유와 가스 간의 조건 모두 기각되었다. 평균적으로 석탄과 가스는 과잉 사용되었으며, 석유는 과소 투입된 것으로 나타났다. 연료간의 배분 효율화를 통하여 연간 평균적으로 1,000만 톤 이상의 CO_2 감축이 가능한 것으로 추정되었다.

주제어 : 배분 효율성, 왜곡상수, 잠재 CO_2 감축량, 화력발전

* 이 논문은 인하대학교의 지원과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-330-B00087).

** 인하대학교 국제통상학부 교수.

Generally speaking, firms, faced with a regulatory environment, are likely to use more or less inputs than optimal level due to allocative inefficiency of inputs. This paper, first, tests allocative efficiency of fuel inputs and calculates the divergence between the actual and optimal levels of each fuel input conditional on the optimal level of capital stock in Korean thermal power industry. Then, given that each fuel is efficiently allocated, potential reduction of CO₂ is estimated over the period 1987~2008. The null hypothesis of allocative efficiency with respect to all fuels is rejected, indicating that thermal power plants fail to attain cost minimization subject do market prices. Allocative efficiency between each pair of fuels is also tested; efficient uses of fuels relative to each other are all rejected. Empirical results indicate that coal and gas are used more and oil is used less than optimal level. On average, more than 10 million tons of CO₂ per year could be reduced by achieving allocative efficiency of fuels.

Keywords : allocative efficiency, distortion factor,
potential CO₂ reduction, thermal power generation

JEL 분류 : C32, D22, L94, Q54

I. 서 론

정부는 2009년 12월 코펜하겐에서 개최된 15차 기후변화협약 당사국 총회에서 자발적으로 온실가스를 2020년 예상배출량(BAU) 대비 30% 감축할 것을 선언하였다. 하지만 온실가스 배출규모가 세계 10위이고 석유, 석탄 등 화석연료 의존도가 80%에 육박하는 에너지 사용 증가율은 3%로 세계 9위로서 자동차, 조선, 철강, 석유화학 등 한국의 주력산업이 대부분 에너지 집약 업종임을 감안 할 때 정부의 '저탄소 녹색성장' 정책기조를 유지하면서 이러한 온실가스 중기 저감목표 달성을 그리 용이하지 않을 전망이다.¹⁾ 이는 온실가스를 감축하기 위하여 생산 자체를 줄이거나 신재생에너지 개발, 저감시설 투자 등 상당한 비용 지출이 수반되어 산업의 경쟁력 저하로 이어지기 때문이다.

온실가스 규제의 산업 경쟁력 파급효과를 최소화하는 것이 정부의 '저탄소 녹색성장' 달성을 여부를 결정하는 중요한 과제라고 할 수 있으며 이에 대한 효과적인 방안으로서 에너지 사용의 효율성 향상을 들 수 있다. 1970년대 고도 경제성장시대에 도입한 에너지 가격 보조 정책은 당시 생산성, 기술 등에서 일천한 중화학산업을 유치산업으로 육성하고 대외적 가격경쟁력 우위를 통한 수출 확대 및 경제발전에 적지 않은 기여를 하였지만 한편으로는 에너지 다소비 산업구조로의 고착과 다른 생산요소와 비교하여 에너지가 상대적으로 과잉 투입되는 비효율적인 에너지 사용을 초래하는 부작용을 낳기도 하였다.

일반적으로 정부규제, 불완전한 시장구조 등으로 생산요소의 비효율적 투입이 이루어지고 이는 기업의 비용최소화 달성을 방해하는 요인으로 작용한다. Atkinson and Halvorsen(1984)은 수익률규제에 직면한 미국 전력산업을 대상

1) 에너지 다소비 업종이 전체 산업에서 차지하는 비중은 2006년 현재 일본은 4.6%, 미국은 3.1%인 반면에 한국은 8%이며, GDP에서 차지하는 비중 또한 독일 5.8%, 일본 5.4%, 미국 3.9%인데 비해 한국은 9.3%이다.

으로 비용최소화라는 최적 상황을 가정하지 않고 생산요소간의 배분 효율성(allocative efficiency) 달성을 여부를 검증하였으며, 생산요소 모두 적정 수준에서 투입되고 있다는 귀무가설은 기각되었다. Atkinson and Cornwell(1994)은 기술, 배분 비효율성으로 인한 미국 항공업의 기업별 비용 증가 및 생산요소의 과잉·과소 투입비율을 측정하였다.²⁾ Atkinson and Halvorsen(1998)은 미국 제조업 및 항공업의 정태균형(static equilibrium) 여부를 분석하기 위하여 비용최소화를 수반하는 생산요소의 투입 여부와 완전경쟁 수준의 생산량 달성을 여부를 검증한 결과 두 산업 모두 정태균형의 조건을 만족시키지 못하였다. Lee(2002)는 아황산가스 배출규제가 미국 전력산업에 미치는 파급효과를 분석하는데 있어서 비용최소화의 전제조건은 기각되었으며 비용최소화를 가정할 경우 편의의(biased) 결과가 초래됨을 주장하였다. 이명현·강상목(2007)은 국내 제조업을 대상으로 사전 검증작업 없이 생산요소 사이의 기술, 배분 효율성 달성을 가정하고 측정한 시장지배력은 실제보다 높게 추정될 수 있음을 계량적으로 입증하였다.

2005년 현재 산업·발전 분야에서 발생되는 온실가스 비중이 전체의 54.4%를 차지하는 상황에서 생산량 변화 없이 생산요소간의 효율적 배분을 통하여 적정 수준의 에너지 사용을 유도할 경우 중·장기적으로 가격보조의 점진적 축소와 함께 에너지 가격을 현실화하고 에너지 절약, 친환경 공정 및 산업구조로의 전환 등을 추진하는 데 요구되는 많은 시간과 비용부담에서 벗어나 단기적으로 온실가스 저감규모에서 상당한 성과를 기대할 수 있다. 특히 국내 전력생산

2) 산출물에 대한 기술 비효율성은 비용 증가 없이 기업이 생산량을 늘릴 수 있는 정도를 나타내며 투입물에 대한 기술 비효율성은 주어진 산출물의 양을 생산하면서 기업이 얼마만큼 비용단가를 낮출 수가 있는지에 초점이 맞추어져 있다. 민동기(2010)는 DEA 기법을 이용하여 국내 제조업의 부문별 기술효율성을 측정하고 전력사용 효율성을 개선시킴으로써 절감할 수 있는 온실가스의 양을 추정한 결과 전력사용으로 인한 총 온실가스 발생량의 17.1~25.5%만큼 줄일 수 있는 것으로 나타났다. Farrell(1957)의 기술효율성은 Shephard(1953) 투입물거리함수 값의 역수를 계산함으로써 측정한다. 이때 투입물거리함수는 생산량 감소 없이 모든 투입물을 동일하게 줄일 수 있는 최대 비율로 정의된다(Färe and Grosskopf, 1990; Hailu and Veeman, 2000).

에서 50~60%의 비중을 차지하는 화력발전에 투입되는 화석연료간의 효율적 사용이 이루어진다면 온실가스 감축효과를 제고하는 데 많은 기여를 할 것이다.

화력발전소의 생산구조 특성을 분석하기 위하여 다음과 같이 생산함수를 고려한다.

$$Q = f(K, F_c, F_o, F_g t), \quad (1)$$

여기서 Q 는 전력량이고, K 는 자본스톡이다. F_i 는 화석연료로서 석탄(c), 석유(o), 가스(g)를 사용한다. t 는 시간지표로서 기술변화를 측정한다.

발전소가 전력생산의 비용최소화를 추구하는 데 있어서 생산함수 (1)로 주어진 발전량 제약조건뿐만 아니라 각종 정부규제 및 여러 제약된 상황에 직면하게 되어 각 생산요소의 적정 투입량과 요소간의 적정 투입비율을 선택하는 데 제한을 받게 된다.³⁾ 영향을 가장 많이 받는 환경규제의 경우 정책당국은 SO₂를 줄이기 위하여 배출허용기준을 설정하고 제한적으로 저감방식에도 규제를 가하여 탈황기(scrubber)의 설치 및 저유황유와 천연가스의 사용을 의무화하여 왔다. 또한 온실가스 저감을 위하여 탄소배출계수가 상대적으로 낮은 천연가스 사용의 비중을 늘리는 추세이다. 이로 인하여 자본과 연료 간 그리고 화석연료 사이의 효율적인 배분을 저해하게 되며 규제가 강화될수록 각 투입요소의 최적 투입량과 실제 투입량의 차이는 커지게 되는데, 발전소에 대한 추가 제약조건으로서 다음의 규제함수를 정의할 수 있다.

$$R = g(|x_i - x_i^*|, t), \quad (2)$$

여기서 R 은 생산요소의 효율적 투입을 제한하는 규제 강도이다. $|x_i - x_i^*|$ 는

3) 공기업의 특성상 이윤극대화, 비용최소화 등만을 지향할 수 없는 현실적 여건과 독점으로 야기되는 X-비효율성 문제 등을 들 수 있다. 권오상·박호정(2010)은 정부규제나 기술적 요인으로 인하여 시장이 불완전 경쟁인 경우를 반영하여 국내 화력발전소를 대상으로 생산성 변화요인을 분석하였다.

각 투입요소 $x_i (= K, F_i)$ 의 실제 투입량과 적정 투입량과의 차이의 절대적 크기이며, x_i^* 는 x_i 의 적정 수준을 나타낸다. t 는 기술진보로 인한 규제강도의 완화 가능성을 반영한다.

생산함수 (1)과 규제함수 (2)를 제약조건으로 화력발전소의 비용최소화 문제를 풀기 위하여 다음과 같이 라그랑지(Lagrangian) 함수를 정의한다.

$$\mathcal{L} = \sum_i w_i x_i + \lambda(Q - f(x, t)) + \mu(R - g(|x - x^*|, t)), \quad (3)$$

여기서 x 는 투입요소 x_i 의 벡터이며, w_i 는 x_i 의 시장가격이다. λ 와 μ 는 라그랑지 승수이다. 생산요소 x_i 와 x_j 의 적정 투입을 위한 1차 필요조건으로부터 다음의 비용최소화 조건을 도출할 수 있다.

$$\frac{f_i}{f_j} = \frac{w_i + \mu g_i}{w_j + \mu g_j} \neq \frac{w_i}{w_j}, \quad (4)$$

여기서 $f_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$, $g_i \equiv \frac{\partial g}{\partial x_i}$ 이다. 생산량 제약조건 이외의 규제환경에 처할 경우 비용최소화 달성을 위한 필요조건인 두 생산요소간의 한계기술대체율과 시장가격의 비율은 일치하지 않음을 알 수 있다.

쌍대성이론(duality theory)을 이용하여 발전소의 생산함수 특성을 실증적으로 분석하기 위하여 최적 행위를 전제로 신고전학적 비용함수를 추정할 경우 현실적 상황과 괴리된 왜곡된 결과를 얻게 된다. 따라서 비용최소화를 가정하지 않고 최적화 행위 여부를 검증할 수 있는 포괄적 개념의 비용함수의 사용이 요구된다. 이를 위하여 비용최소화의 1차 조건식 (4)에서 암묵가격(shadow price), $w_i^s (\equiv w_i + \mu g_i)$ 를 정의하고 이들의 함수인 암묵비용함수를 도입한다. 본 논문에서는 기존 선행연구에서 생산요소간의 배분 효율성 검증을 위하여 도출한 암묵비용함수를 응용하여 자본스톡을 준고정(quasi-fixed)으로 설정한 화력발전산업의 제약암묵비용함수를 추정한다. 추정 결과를 토대로 투입연료간의

효율적 배분 여부를 검증하고, 적정 수준 대비 각 연료별 투입량 규모를 계산한 후 연료의 배분 효율화를 통한 잠재적 CO₂ 감축량을 산출한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제Ⅱ장에서는 국내 에너지별 발전량과 화석발전 연료 사용량 추이를 살펴보았으며, 제Ⅲ장에서는 실증분석을 위한 계량모형을 제시하였다. 제Ⅳ장에서는 자료설명과 함께 추정 결과를 분석하였다. 제Ⅴ장은 결론 부분이다.

II. 국내 화력발전 현황

국내 전력 생산량을 에너지별로 분류하면 <표 1>에 나타나는 바와 같이 주로 화력과 원자력에 의존하였다. 1994~2008년 기간에 걸쳐 총 발전량에서 화력발전이 차지하는 비율의 연도별 변화추이를 분석하면 1997년까지는 60%대 초반을 유지하다가 1999년에 54%로 최저 수준까지 떨어진 후 2006년까지 50%대 후반에서 등락을 거듭하였다. 이후 2007년부터 60%대로 다시 늘어나는 양상을 보였다. 반면에 원자력의 비중은 화력발전과 반대방향으로 움직였고 1994~2008년 기간 동안 34~43%의 범위를 나타내었다.

신재생에너지로서 수력은 발전량 규모 자체에 큰 변화가 없어서 총 발전량에서 차지하는 비중이 1990년대의 2%대에서 2000년대 1%대로 낮아졌다. 풍력, 태양광, 폐기물 소각 등 대체에너지에 의한 전력 생산은 발전량 규모는 미약하나 증가추세는 해가 거듭할수록 탄력을 받는 모습이다.

화력발전의 연료별 사용량 변화추이를 비교하면 무연탄과 유연탄을 합한 석탄의 경우 <표 2>에서 보는 바와 같이 1994~2008년 기간 동안 사용량이 지속적으로 증가하였다. 이는 다른 화석연료에 비해 석탄의 탄소배출계수가 상대적으로 크기 때문에 발전부문에서의 CO₂ 발생량을 늘리는 한 요인으로 작용하였다. 이와는 반대로 경유와 중유로 구성된 석유 사용량은 감소하는 추세이다. 1997

〈표 1〉 에너지원별 발전량

(단위 : GWh)

연도 \ 에너지	수력	화력	원자력	대체에너지 ¹⁾	합계
1994	4,098	102,244	58,651	-	164,993
1995	5,478	112,154	67,029	-	184,661
1996	5,201	126,369	73,924	-	205,494
1997	5,403	141,956	77,086	-	224,445
1998	6,099	119,512	89,689	-	215,300
1999	6,066	130,195	103,064	-	239,325
2000	5,610	151,826	108,964	-	266,400
2001	4,151	168,940	112,133	-	285,224
2002	5,311	182,060	119,103	-	306,474
2003	6,887	185,893	129,672	-	322,452
2004	5,861	205,222	130,715	350	342,148
2005	5,189	212,266	146,779	404	364,638
2006	5,219	226,703	148,749	511	381,181
2007	5,042	254,316	142,937	829	403,124
2008	5,563	264,742	150,958	1,092	422,355

주 : 1) 2004년 이후 대체에너지를 유류에서 분리하여 계시함.

자료: 한국전력공사, 『한국전력통계』, 2009.

년까지 연간 900여만 kJ의 사용량을 유지하다가 외환위기 여파로 1998년에 300만 kJ대로 떨어진 후 증가와 감소를 반복하면서 하향세를 이어갔으며 2008년에는 200여만 kJ까지 줄어들었다. 가스의 사용량은 대체로 증가하는 추이이다. 외환위기로 인하여 1998년에 가스 사용이 잠시 위축되었으나 이후로는 점차 확대되는 양상을 보였다. 화석연료 가운데 탄소배출계수가 가장 낮은 LNG의 사용 증가세는 투입량의 규모나 증가율에서 석탄 사용량에 아직 미치지 못하는 관계로 발전부문에서 온실가스 발생량을 감소추세로 전환시키는 데는 한계가 있다.

〈표 2〉 화력발전 연료 사용량 추이

연도 \ 연료	석탄(만 톤)	석유(만㎘)	LNG(만 톤)
1994	1,614.8	918.5	332.9
1995	1,863.2	968.7	356.2
1996	2,146.1	980.8	462.2
1997	2,501.2	988.0	537.7
1998	2,820.7	340.4	418.9
1999	3,081.3	334.8	476.7
2000	3,621.7	508.6	449.1
2001	4,079.5	560.4	479.1
2002	4,306.2	480.5	598.3
2003	4,445.7	505.5	599.6
2004	4,792.7	434.0	822.1
2005	5,029.7	416.8	853.8
2006	5,260.4	378.9	946.6
2007	5,834.2	401.9	1,082.9
2008	6,577.2	214.2	1,051.5

자료: 한국전력공사, 『한국전력통계』, 2009.

2000년에 들어서는 석유 사용량은 감소세를 보였고, 석탄과 가스의 사용량은 증가세를 보이며 극명한 대조를 나타내었다. 이는 중국, 인도 등의 고성장과 달리 약세, OPEC 국가들의 석유 증산 제한 등으로 인하여 국제유가가 급격히 상승하기 시작하였고, 정부가 SO₂ 저감방안으로서 연료용 사용 유류의 유황함유율 기준을 단계적으로 강화시킴으로써 투입단가가 상승한 석유를 줄이고 상대적으로 저렴한 석탄을 늘린 결과로 나타난 현상으로 볼 수 있다.⁴⁾

4) 1981년에 중유는 4.0%에서 1.6% 이하로, 경유는 1.0%에서 0.4% 이하로 강화한 후, 1993년부터는 중유는 1.0% 이하, 경유는 0.2% 이하의 유류 사용을 의무화하였다. 1997년에 중유는 0.5%로 재차 상향조정되었고, 2001년에는 중유, 경우 모두 각각 0.3%, 0.1%로 한층 강화되었다(환경부, 2000).

III. 계량모형

투입요소별 암묵가격을 측정 가능한 형태로 나타내기 위하여 Lau and Yotopolous(1971)를 따라서 1차 Taylor 전개하여 다음과 같이 시장가격에 상수 비례화시킨다(Atkinson and Halvorsen, 1984).⁵⁾

$$w_i^s = k_i w_i, \quad (5)$$

여기서 k_i 는 각 투입요소의 시장가격을 암묵가격으로 전환하기 위한 비례상수로서 여러 규제 유형의 추가 제약조건으로 인하여 시장가격과 기업이 직면한 가격, 즉 암묵가격과의 괴리가 존재하므로 본 논문에서는 왜곡상수(distortion factor)로 지칭한다. 만약 $k_i = 1$ 이면 암묵가격은 시장가격과 일치하게 되고 식(4)의 비용최소화 조건은 성립한다.

투입요소별 왜곡상수가 시간 경과에 따라 변할 수 있는 상황을 가정하고 왜곡상수를 다음과 같이 일반화시킬 수 있다.

$$k_i = \exp(\lambda_i + \lambda_{it} t), \quad i = c, o, g, \quad (6)$$

여기서 λ_i 는 환경규제 등 제반 규제로 인하여 발생하는 시장가격과 암묵가격 간의 괴리 정도를 측정하며, λ_{it} 는 시간의 흐름에 따라 왜곡상수의 변화 가능성을 반영한다.

시장비용의 최소화라는 최적 상황을 가정하지 않고 연료의 효율적 투입 및 배분 여부를 검증하기 위하여 쌍대성이론(duality theory)에 따라서 적정 수준의 자본스톡 투입을 전제로 생산함수 (1)에 상응한 투입연료의 제약암묵비용함수를 도출하면 다음과 같다.

5) Atkinson and Halvorsen(1984)은 발전소에 대한 규제 유형으로서 수익률(rate of return) 규제, 연료조정조항(fuel adjustment clauses), 환경규제 등을 언급하였다.

$$RC^s = RC^s(k_c w_c, k_o w_o, k_g w_g, K, Q, t).$$

K 가 자본투입함수로서 비체감성(non-decreasing), 오목성(concavity), 1차 동차성(linear homogeneity)이 성립한다면 제약암묵비용함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RC^s = K \cdot EC^s(k_c w_c, k_o w_o, k_g w_g, Q, t), \quad (7)$$

여기서 EC^s 는 정규조건(regularity condition)을 만족시키는 암묵에너지비용함수이다.

제약암묵비용함수 (7)을 추정하기 위하여 다음과 같이 초월대수함수 형태를 선택한다. 여기서 시간지표 t 는 전이변수(shift variable)이다.⁶⁾

$$\begin{aligned} \ln RC^s &= \ln K + \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \alpha_t t + 0.5 \gamma_{QQ} (\ln Q)^2 \\ &\quad + \sum_i \alpha_i \ln(k_i w_i) + 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln(k_i w_i) \ln(k_j w_j) \\ &\quad + \sum_i \gamma_{iQ} \ln(k_i w_i) \ln Q, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji}, \quad i \neq j, \quad i, j = c, o, g.$$

셰퍼드(Shephard) 정리를 이용하여 식 (8)을 연료투입요소의 암묵가격으로 대수적(logarithmically)으로 미분함으로써 다음과 같이 각 투입연료의 암묵비용 몫방정식을 도출한다.

$$\begin{aligned} m_i^s &= \frac{\partial \ln RC^s}{\partial \ln(k_i w_i)} = \frac{k_i w_i}{RC^s} \cdot \frac{\partial RC^s}{\partial (k_i w_i)} = \frac{k_i w_i F_i}{RC^s} \\ &= \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(k_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q, \quad i, j = c, o, g. \end{aligned} \quad (9)$$

6) 암묵비용함수가 투입요소의 암묵가격에 대하여 선형 동차성이 충족되기 위하여 다음의 제약 조건을 부여한다.

$$\sum_i \alpha_i = 1, \quad \sum_i \gamma_{ij} = \sum_j \gamma_{ij} = \sum_i \sum_j \gamma_{ij} = \sum_i \gamma_{iQ} = 0.$$

식 (8)을 단독으로 추정하는 것보다 식 (9)와 함께 연립방정식을 구성하여 하나의 방정식체계로 추정할 경우 자유도를 추가적으로 얻을 수 있다.⁷⁾ 제약된 환경에서 최적 생산량을 결정하는 데 있어서 기업은 제약암목비용 $RC^s = \sum_i k_i w_i \cdot F_i$ 의 최소화를 추구하지만 식 (8)과 식 (9)의 종속변수 RC^s 와 m_i^s 에 대한 자료를 구할 수 없기 때문에 이를 방정식을 직접 추정하는 것은 불가능하다. 따라서 식 (8)과 식 (9)를 각각 시장자료가 존재하는 연료투입의 실제 비용과 비용몫의 방정식으로 나타내는 작업이 요구된다.

식 (9)의 암목비용몫방정식으로부터 다음과 같이 각 연료투입량을 산출할 수 있다.

$$F_i = \frac{m_i^s \cdot RC^s}{k_i w_i}. \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 계산한 실제연료비용(FC)과 투입연료의 비용몫(m_i)은 각각 다음과 같다.

$$FC \equiv \sum_i w_i F_i = RC^s \sum_i m_i^s k_i^{-1}, \quad (11)$$

$$m_i \equiv \frac{w_i F_i}{FC} = \frac{RC^s m_i^s k_i^{-1}}{FC} = \frac{m_i^s k_i^{-1}}{\sum_i m_i^s k_i^{-1}}. \quad (12)$$

식 (8)과 식 (9)를 식 (11)과 식 (12)에 대입함으로써 다음과 같이 실제연료비용과 비용몫방정식을 도출할 수 있다.

$$\ln FC = \ln K + \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \alpha_t t + 0.5 \gamma_{QQ} (\ln Q)^2$$

7) 비용함수만을 추정하면 추정계수의 자유도는 $(n-k)$ 이지만 연립방정식 형태의 하나의 방정식체계로 추정할 경우 자유도는 방정식 수에 비례하여 $(m \cdot n - k)$ 로 늘어나게 된다. 여기서 n = 관찰치 수, k = 추정계수 수, m = 방정식 수이다.

$$\begin{aligned}
 & + \sum_i \alpha_i \ln(k_i w_i) + 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln(k_i w_i) \ln(k_j w_j) \\
 & + \sum_i \gamma_{iQ} \ln(k_i w_i) \ln Q \\
 & + \ln \left[\sum_i (\alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(k_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q) / k_i \right] \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$m_i = \frac{\left[\alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(k_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q \right] / k_i}{\sum_i \left[\alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(k_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q \right] / k_i}, \quad i, j = c, o, g. \quad (14)$$

암묵요소가격에 대한 암묵비용함수의 동차성을 제약조건을 부여한 후 식 (13)과 식 (14)를 연립방정식 형태로 동시에 추정하는 데 있어서 각 방정식의 오차항간 이분산(heteroscedasticity)이 존재하는 것으로 판단되어 Gollop and Roberts (1983)와 Halvorsen and Smith (1984) 등을 따라서 반복 비선형 젤너 (Iterative nonlinear Zellner) 방식을 사용한다. 이때 각 연료의 비용몫의 합이 1이 되므로 특정 한 연료의 비용몫방정식을 연립방정식에서 제외해야 하는데 어느 연료를 선택하느냐와 관계없이 추정 결과는 동일하다.

화석연료간의 배분효율성은 상대가격 효율성과 절대가격 효율성으로 분류할 수 있다. 상대가격 효율성은 식 (4)의 비용최소화 1차 필요조건이 충족되어 투입 연료간의 한계기술대체율과 시장가격이 일치될 경우 달성된다. 연료간 암묵가격의 왜곡상수에 대하여 $k_i = k_j$, $i, j = c, o, g$ 가 성립하면 식 (4)의 비용최소화 조건이 충족되어 상대가격 효율성은 존재하게 된다. 비용최소화뿐만 아니라 생산의 효율화까지 의미하는 절대가격 효율성은 각 연료의 한계생산과 시장가격이 일치하는 상황으로서 모든 연료의 왜곡상수에 대하여 $k_i = 1$, $i = c, o, g$ 일 때 달성된다.

하지만 Atkinson and Halvorsen (1998)이 입증한 것처럼 식 (13)의 비용함수와 식 (14)의 비용몫방정식이 k_i 에 대하여 0차 동차함수인 관계로 연료별 k_i 의 절대값을 얻는 것은 사실상 불가능하다.⁸⁾ 따라서 절대가격 효율성의 달성이 여부

8) Atkinson and Halvorsen (1984)은 요소별뿐만 아니라 기업별 왜곡상수 역시 추정이 불가능한 것으로 보고 각 투입요소에 대한 기업별 왜곡상수는 동일한 것으로 간주하였다. 하지만

에 대한 검증작업은 수행할 수 없으나 일련의 표준화 과정을 통하여 k_i 의 상대값은 추정이 가능하므로 상대가격 효율성 존재 여부에 대한 검증은 가능하다. 본 연구에서는 표준화작업으로서 가스에 대한 왜곡상수를 1로 설정하고 다른 연료의 왜곡상수와 상대적 크기를 비교한다.⁹⁾ 검증방식은 χ^2 분포를 갖는 Wald-검증법을 사용하여 1% 유의 수준에서 가설검증을 실시한다.

IV. 분석 결과

모형추정을 위하여 국내 화력발전산업을 대상으로 1987~2008년 기간에 걸친 연도별 시계열 자료를 사용하였다. 전력 산출량(Q)은 한국전력공사에서 매년 발간하는『경영통계』의 화력발전량을 사용하였으며, 자본스톡(K)은 화력발전 설비용량으로 측정하였다. 석탄 투입량(c)은 무연탄과 유연탄의 사용실적을 합산한 총량이며, 석탄가격(w_c)을 산정하기 위하여 무연탄 가격과『에너지통계연보』에서 보고된 연료용 유연탄의 수입가격을 각 사용량으로 가중 평균하였다. 석유투입량(o)은 경유와 중유의 사용실적을 합하여 얻었고, 석유가격(w_o)은 병커-C유 가격과 경유가격을 각 사용량으로 가중 평균하여 구하였다. 가스 투입량 (g)과 가스가격(w_g)은 각각 LNG 사용실적과 LNG 산업 소비자가격을 사용하였다. 대부분 통계자료의 출처는『경영통계』이다. 모형 추정에 사용된 통계자료를 요약하여 <표 3>에서 제시하였다.

연료비용함수 (13)과 연료별 비용몫방정식 (14)를 연립방정식으로 추정한 결과 오차항 사이에 2차 자기상관(autocorrelation)이 존재하는 것을 발견하게 되어 2차

Atkinson and Cornwell(1994)은 단위 기간의 길이가 기업의 수보다 큰 패널자료를 사용할 경우 기업 고유의 왜곡상수의 추정도 가능함을 입증하였다.

9) $k_g = 1$ 이 성립하기 위하여 $\lambda_g = \lambda_{gt} = 0$ 이 되어야 한다. 여기서 석탄이나 석유의 왜곡상수를 1로 표준화하더라도 각 왜곡상수의 절대 크기만 달라질 뿐 각 연료간의 상대적 크기에는 변화가 없다.

〈표 3〉 자료 통계

변 수	단 위	평 균	표준편차	최 대	최 소
Q	TWh	133.47	70.477	259.41	29.334
K	GW	26.343	11.995	47.588	11.043
w_c	천 원/톤	45.044	22.160	135.50	31.125
w_o	천 원/kJ	191.50	131.24	586.98	73.917
w_g	천 원/톤	354.78	129.32	641.26	228.13
FC	조 원	4.5373	4.0575	16.912	0.972
m_c	-	0.308	0.073	0.527	0.223
m_o	-	0.260	0.112	0.438	0.074
m_g	-	0.432	0.083	0.614	0.339

〈표 4〉 화력발전산업 제약암묵비용함수 추정 결과

계 수	추정값	계 수	추정값
α_0	-14.886(5.8828)**	λ_{gt}	0
α_Q	3.0571(2.3978)	γ_{cc}	- 0.4300(0.2143)*
α_t	- 0.1905(0.1138)*	γ_{co}	- 0.0808(0.0567)
α_c	3.3820(0.6701)**	γ_{cg}	0.5109(0.2312)*
λ_c	1.7753(0.2461)**	γ_{oo}	0.1186(0.0369)**
λ_{ct}	- 0.0205(0.0084)**	γ_{og}	- 0.0378(0.0628)
α_o	- 1.8191(0.6746)**	γ_{gg}	- 0.4731(0.2728)*
λ_o	2.4451(1.0514)*	γ_{cQ}	- 0.7747(0.1545)**
λ_{ot}	0.0453(0.0658)	γ_{oQ}	0.4858(0.1414)**
α_g	- 0.5629(0.2021)**	γ_{gQ}	0.2889(0.0889)**
λ_g	0	γ_{QQ}	- 0.6574(0.5280)

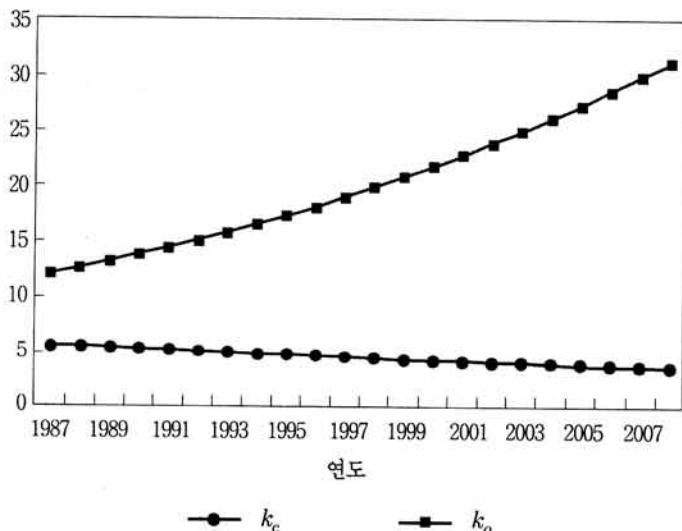
주: 1) () 안의 숫자는 표준오차를 나타냄.

2) **, *은 각각 1%, 5% 수준에서 유의적임을 나타냄.

〈표 5〉 가설검증 결과 (1% 유의 수준)

제약조건	Wald-통계량	임계치	자유도
$\lambda_{ct} = \lambda_{ot} = 0$	11.68	9.21	2
$k_c = k_o (= 1)$	393.39	9.21	2
$k_c = k_o$	36.02	6.63	1
$k_c = k_g (= 1)$	52.99	6.63	1
$k_o = k_g (= 1)$	358.84	6.63	1

〈그림 1〉 왜곡상수 연도별 변화 추이



자기회귀(AR) 모형으로 재추정하였으며 그 결과는 〈표 4〉에서 보는 바와 같다. 20개의 추정계수 가운데 10개는 1% 수준에서, 5개는 5% 수준에서 각각 통계적 유의성을 보였다. R^2 값은 방정식별로 0.74~0.99의 범위를 나타내었다.

연료간의 배분 효율성에 관한 가설들의 검증 결과를 〈표 5〉에 제시하였다. 시간 경과와 무관하게 연료별 왜곡상수는 일정하다는 귀무가설은 제약조건 $\lambda_{ct} = \lambda_{ot} = 0$ 의 Wald-통계량을 계산한 결과 1% 유의 수준에서 기각되었다.

<그림 1>에서 추정된 연료간의 왜곡상수의 변화추이를 비교하면 연료별 왜곡상수 추정을 위하여 설정된 가스의 왜곡상수 1을 기준으로 석탄의 왜곡상수(k_c)는 시간이 갈수록 하향 추세를 보인 반면 석유의 왜곡상수(k_o)는 증가하는 양상을 보였다.¹⁰⁾ $k_c(k_o)$ 를 t 로 OLS 선형회귀분석을 실시한 결과 평균적으로 매년 2.05%(4.53%)씩 감소(증가)하는 것으로 나타났다. 이는 $k_c = k_o = 1$ 이면 기업은 규제가 없는 상황에서와 같이 비용최소화 달성이 가능하다고 볼 때, 화력발전산업은 석유투입에서 석탄에 비해 상대적으로 제약된 환경에 직면하였으며 그 정도는 점점 증가하는 추세임을 나타낸다.

세 연료 사이에 상대가격 효율성이 달성될 경우 부여되는 제약조건 $k_c = k_o = 1$ 의 귀무가설이 강하게 기각됨으로써 연료간의 비효율적 투입으로 인한 추가 생산비용이 초래되고 있음을 판단할 수 있다. 세부적으로 두 연료간의 상대 가격 효율성 달성을 여부를 검증한 결과 석탄-석유, 석탄-가스, 석유-가스 간에 모두 효율적으로 배분이 이루어지고 있지 않음을 알 수 있다. 이러한 검증 결과는 전력생산을 위한 연료 사용 과정에서 연료별로 적정 수준 대비 과잉 혹은 과소 투입이 이루어지고 있음을 의미한다.

배분 비효율성으로 인한 연료별 적정 수준 대비 과잉 혹은 과소 투입비율을 산정하기 위하여 먼저 실제 연료비용과 각 연료에 대한 비용몫의 추정값을 식 (12)에 대입하여 연료투입량의 추정치(\hat{F}_i)를 계산한다. 이번에는 연료간의 배분 효율성이 달성되는 상황을 가정할 경우, 즉 식 (13)과 식 (14)에 $k_c = k_o = 1$ 을 대입함으로써 얻은 적정 수준의 연료투입량 추정치(\hat{F}_i^e)를 산정한다. 이들 추정치간의 차이 정도를 측정한 실제투입량 대비 적정 수준과의 이격률(discrepancy ratio)을 토대로 연료별 과잉·과소 투입량을 산출한 후, 다음 계산식을 통하여 연료간의 효율적 배분을 통하여 달성 가능한 연료별 CO₂ 잠재적 증감량을 추정한다. <표 6>은 세 연료가 적정 수준으로 투입될 경우 감축 가능한 CO₂의 양을 연료별·연도별로 산출한 결과이다.

10) 석탄, 석유의 연도별 왜곡상수는 해당 연료의 λ_i , λ_{it} 추정값을 식 (6)에 대입하여 구한다.

$$CO_2^i = \frac{\widehat{F}_i^e - \widehat{F}_i}{\widehat{F}_i} \cdot F_i \times (cv_i/10^7) \times tc_i \times cr_i \times (44/12), i = c, o, g, \quad (15)$$

여기서 F_i 는 각 연료의 실제투입량(톤, kl)이며, cv_i 는 발열량(kcal/kg, kcal/l), tc_i 는 탄소배출계수(톤/TOE), cr_i 는 연소율을 나타낸다.¹¹⁾

<표 6>에서 보듯이 실제 투자된 발전설비용량 규모를 적정으로 볼 때 석탄의 경우 1990년대 초반까지 과소 투입되었으나 그 이후부터 2008년까지는 과잉 투입된 것으로 나타났다. 석탄을 연료간의 효율적 배분을 통하여 적정 수준으로 투입할 경우 감축 가능한 CO_2 양은 1987~2008년 기간 동안 연평균 900여만 톤에 이르렀다. 특히 선진국에 대한 온실가스 의무감축이 부여된 1997년 교토 기후 변화협약 이후부터는 평균적으로 연간 1,200여만 톤의 CO_2 를 줄일 수 있었다.

석유는 1987~1990년 기간에 걸쳐 과잉 사용된 후 1991~2000년 기간에는 과소 사용으로 전환되었으나 그 이후로는 2004년, 2008년만 빼고 다시 과잉 투입되는 등 적정 투입량을 기준으로 등락이 심하였다. 1980년대 말과 2000년대 들어 과잉 투입된 석유 소비량을 감소시킴으로써 해당 연도의 CO_2 배출량을 저감할 수 있으나 기타 해에서 석유가 적정 수준에 못 미치게 투입된 것으로 나타남에 따라 표본기간 전체로 볼 때 연료의 효율적 배분으로 오히려 매년 평균적으로 약 30만 톤이 늘어나는 양상을 보였다.

가스는 1987년만 제외하고 모든 해에서 과잉 사용된 것으로 나타났으며 적정 량과의 이격 정도는 점점 커지는 추세이다. 따라서 가스 사용량을 적정 수준으로 유지할 경우 연료간의 효율적 배분의 CO_2 감축효과도 이에 비례하여 증가하였다. CO_2 잠재적 감축량을 t 로 OLS 선형회귀 추정한 결과 연평균 8.5% 증가율을 보였다. 1987~2008년 기간 동안 가스 사용의 조정으로 감축할 수 있는 CO_2 배출량은 연간 평균 140여 만 톤에 달하였다.

전체 평균으로 판단할 때 결국 연료간의 효율적 배분이 달성될 경우 석탄과

11) 1 석유환산톤(TOE)은 $cv/10^7$ kcal로 정의된다.

국내 화력발전산업의 연료의 효율적 배분과 CO₂ 저감규모 추정〈표 6〉 효율적 배분을 통한 연료별 CO₂ 잠재적 증감 추정량

(단위 : 십만 톤)

연도	석탄	석유	가스	합계
1987	-0.69	-16.40	8.42	-8.66
1988	8.13	-7.01	-8.69	-7.57
1989	21.26	-8.61	-6.20	6.45
1990	39.68	-2.91	-6.04	30.73
1991	71.83	2.10	-6.00	67.92
1992	400.1	11.22	-7.24	404.1
1993	-786.4	11.87	-8.15	-782.7
1994	-128.9	15.45	-10.53	-123.9
1995	-104.9	16.79	-11.15	-99.31
1996	-83.01	19.87	-14.18	-77.33
1997	-81.21	19.47	-16.36	-78.09
1998	-118.4	6.19	-12.94	-125.2
1999	-115.2	3.99	-14.81	-126.0
2000	-115.0	0.77	-14.08	-128.3
2001	-122.2	-0.19	-14.98	-137.3
2002	-117.6	-0.15	-18.48	-136.2
2003	-120.1	-2.72	-18.67	-141.5
2004	-120.5	0.97	-24.98	-144.5
2005	-124.1	-0.09	-25.93	-150.1
2006	-130.7	-3.48	-29.12	-163.3
2007	-140.5	-3.83	-33.02	-177.4
2008	-149.0	0.87	-31.30	-179.4
평균	-91.70	2.92	-14.74	-103.5

가스 사용의 축소로 CO₂ 발생을 줄일 수 있지만 석유 사용의 증가로 감소폭은 줄어들었지만 석탄, 가스 감소량이 석유 증가량을 압도함으로써 그 효과는 제한적이다. 총 CO₂ 변화량을 연도별로 살펴보면 석탄 투입의 증가로 1989~1992년 기간 동안 CO₂ 발생은 늘어났지만 나머지 해에서는 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 교토의정서가 체결된 1997년을 기점으로 감축 가능한 CO₂의 양은 점점 확대되는 추세로서 2008년까지 매년 평균적으로 약 5.3%씩 증가하였다. 결국 적정규모의 발전시설을 전제로 세 연료간의 투입배분이 효율적으로 이루어진다면 1987~2008년 기간 동안 연간 평균적으로 1,000만 톤 이상의 CO₂ 감축이 가능한 것으로 나타났다. 이는 2007년 전력산업 총 CO₂ 배출량의 약 5%에相當한 규모로서 전력산업에 직·간접적으로 영향을 미치는 전력가격 규제, 유류 유황함유율 규제 등 제반 산업 및 환경규제가 상대적으로 심하여 생산요소, 특히 석탄, 가스의 적정 투입을 저해하는 왜곡 정도가 그만큼 높음을 의미한다. 민동기(2010)는 제조업에서 전력사용의 효율성이 개선될 경우 총 온실가스 발생량의 최대 25% 정도를 감축할 수 있음을 주장하였다.

V. 결론 및 요약

대외적으로는 포스트-교토협약에서 온실가스 의무감축 국가로의 지정 가능성에 능동적으로 대처하고 국내적으로는 정부의 '저탄소 녹색성장' 정책기조의 성과를 극대화하기 위해서는 중·장기적으로 가격보조의 단계적 철폐와 함께 에너지 가격의 현실화, 기존 에너지 다소비 산업구조에서 에너지 절약, 친환경 공정 및 산업으로의 전환 등을 통한 에너지 사용의 효율성 향상이 요구된다. 하지만 그 과정에서 에너지 가격의 상승과 자본시설 투자비용의 부담으로 초기 기업의 경쟁력이 저하되며 산업구조개편 시 시장진입을 놓고 기존기업과 신규기업의 갈등 등이 야기될 수 있다.

일반적으로 정부규제를 포함한 여러 제약적 환경에 직면한 기업은 동일한 산출량을 생산하는 데 있어서 생산요소간의 투입 조합비율이 효율적이지 못하여 요소별 적정 수준 대비 과잉 혹은 과소 사용이 초래될 수 있다. 산업, 발전 분야에서 요소간의 비효율적 배분으로 인하여 과잉 투입되는 에너지를 적정 수준으로 축소시킬 경우 온실가스를 단기적으로 감소하는 데 효과적인 방안의 하나로서 고려할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 국내 화력발전산업을 대상으로 적정 수준의 자본스톡 규모를 전제로 연료간의 배분 효율성 달성을 여부를 검증하고 연료별 과잉·과소 투입 여부를 분석한 후 적정량의 연료를 사용할 경우 감축할 수 있는 잠재적 CO₂ 규모를 추정하였다.

1987~2008년 기간 동안 석탄, 석유, 가스의 세 가지 연료를 투입하는 데 있어서 효율적인 배분이 이루어지고 있다는 귀무가설은 기각되었으며 두 연료간의 배분 효율성도 달성되지 못하였다. 전 기간에 걸쳐 평균적으로 석탄과 가스는 과잉 사용되었으며 석유는 과소 투입된 것으로 나타났다. 석탄, 가스 사용량을 적정 수준으로 유지할 경우 연평균 각각 900여만 톤과 140여만 톤의 CO₂ 발생을 줄일 수 있으며 석유 사용의 증가를 감안하더라도 전 기간에 걸쳐 연간 평균적으로 1,000만 톤 이상의 CO₂ 감축이 가능한 것으로 추정되었다.

정부의 온실가스 배출관리 장·단기 로드맵 작성과 효율적인 운용을 위해서는 방식별 온실가스 저감의 용이성을 토대로 예상 감축량을 산출하는 등 현황 분석과 관련 기초자료의 수집이 요구된다. 본 논문 연구 결과의 활용도를 제고하기 위하여 향후과제에서는 발전부문과 함께 온실가스 발생 비중이 전체의 50% 이상을 차지하는 산업부문을 대상으로 에너지를 비롯한 생산요소간의 비효율적 배분 상황을 확인한 후 각 생산요소의 적정 수준 투입을 전제로 잠재적 CO₂ 감축량을 추정하는 작업이 추가로 수행되어야 할 것이다.

◎ 참고문헌 ◎

1. 권오상·박호정, “발전부문의 불완전경쟁과 생산성 변화”, 「자원·환경경제연구」, 제19권 제1호, 2010, pp. 3~21.
2. 민동기, “제조업 전력 사용 효율성 제고를 통한 온실가스(CO₂) 감축 잠재량 추정에 관한 연구”, 「환경정책연구」, 제9권 제3호, 2010, pp. 143~160.
3. 에너지경제연구원, 『에너지통계연보』, 1999.
4. 이명현·강상목, “기술적·분배 비효율성을 고려한 제조업 산업별 시장지배력 측정”, 「국제경제연구」, 제13권 제1호, 2007, pp. 153~175.
5. 한국전력공사, 『경영통계』, 1999.
6. 한국전력공사, 『한국전력통계』, 2009.
7. 환경부, 『환경백서』, 2000.
8. Atkinson, S. E. and C. Cornwell, “Parametric Estimation of Technical and Allocative Inefficiency with Panel Data,” *International Economic Review*, 35, 1994, pp. 231~243.
9. Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Parametric Efficiency Tests, Economies of Scale, and Input Demand in U.S. Electric Power Generation,” *International Economic Review*, 25, 1984, pp. 647~662.
10. Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Parametric Tests for Static and Dynamic Equilibrium,” *Journal of Econometrics*, 85, 1998, pp. 33~50.
11. Färe, R. and S. Grosskopf, “A Distance Function Approach to Price Efficiency,” *Journal of Public Economics*, 43, 1990, pp. 123~131.
12. Farrell, M. J., “The Measurement of Productive Efficiency,” *Journal of Royal Statistical Society*, 120, 1957, pp. 253~290.
13. Gollop, F. M. and M. J. Roberts, “Environmental Regulations and Productivity Growth: The Case of Fossil-fueled Electric Power Generation,” *Journal of Political Economy*, 91, 1983, pp. 654~674.
14. Hailu, A. and T. S. Veeman, “Environmentally Sensitive Productivity Analysis of the

- Canadian Pulp and Paper Industry, 1959~1994 : An Input Distance Function Approach," *Journal of Environmental Economics and Management*, 40, 2000, pp. 251~274.
15. Halvorsen, R. and T. R. Smith, "On Measuring Natural Resource Scarcity," *Journal of Political Economy*, 92, 1984, pp. 954~964.
16. Kumbhakar, S. C., "Allocative Distortions, Technical Progress, and Input Demand in U.S. Airlines : 1970~1984," *International Economic Review*, 33, 1992, pp. 723~737.
17. Lau, L. J. and P. A. Yotopoulos, "A Test for Relative Efficiency and Application to Indian Agriculture," *American Economic Review*, 61, 1971, pp. 94~109.
18. Lee, M. H., "The Effect of Sulfur Regulations on the U.S. Electric Power Industry : A Generalized Cost Approach," *Energy Economics*, 24, 2002, pp. 491~508.
19. Shephard, R. W., *Cost and Production Functions*, Princeton, Princeton University Press, 1953.

접수일(2011년 11월 19일), 수정일(2012년 2월 24일), 게재확정일(2012년 3월 7일)